

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-267926

(43)Date of publication of application : 18.09.2002

(51)Int.Cl. G02B 13/00
G02B 13/04
G02B 13/18
G06F 17/50

(21)Application number : 2001-064836

(71)Applicant : OLYMPUS OPTICAL CO LTD

(22)Date of filing : 08.03.2001

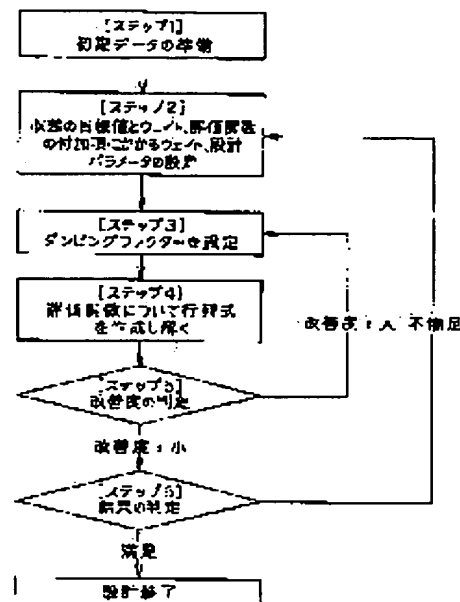
(72)Inventor : HAYAKAWA KAZUHITO

(54) DESIGNING METHOD OF OPTICAL SYSTEM

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a designing method of optical system for efficiently performing the design of an optical system, which is suitably executed with a computer and where the performance change of the optical system caused by a manufacture error is restrained in addition to optical design for aberration.

SOLUTION: In this designing method of optical system, the values of a plurality of component elements are changed so that the optical system expressed by the plurality of component elements may have desired characteristic, and an evaluation function for evaluating that the value of each component element approaches to the optimum value of the component element as the entire optical system is made to approach to the desired value, whereby the optimum value of the component element is obtained. The method has a means for calculating the eccentric aberration coefficient of an optical group consisting of at least one surface of the optical action surfaces of the optical system and the evaluation function including at least one item of the evaluation function consisting of at least one eccentric aberration coefficient.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision]

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-267926

(P2002-267926A)

(43)公開日 平成14年9月18日(2002.9.18)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード(参考)
G 0 2 B 13/00		G 0 2 B 13/00	2 H 0 8 7
13/04		13/04	D 5 B 0 4 6
13/18		13/18	
G 0 6 F 17/50	6 8 0	G 0 6 F 17/50	6 8 0 A

審査請求 未請求 請求項の数3 O L (全 11 頁)

(21)出願番号 特願2001-64836(P2001-64836)

(22)出願日 平成13年3月8日(2001.3.8)

(71)出願人 000000376

オリンパス光学工業株式会社

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号

(72)発明者 早川 和仁

東京都渋谷区幡ヶ谷2丁目43番2号 オリ

ンパス光学工業株式会社内

(74)代理人 100097777

弁理士 荻澤 弘 (外7名)

Fターム(参考) 2H087 LA03 PA04 PA18 PB05 QA02

QA03 QA07 QA17 QA19 QA21

QA26 QA34 QA41 QA46 RA05

RA12 RA42

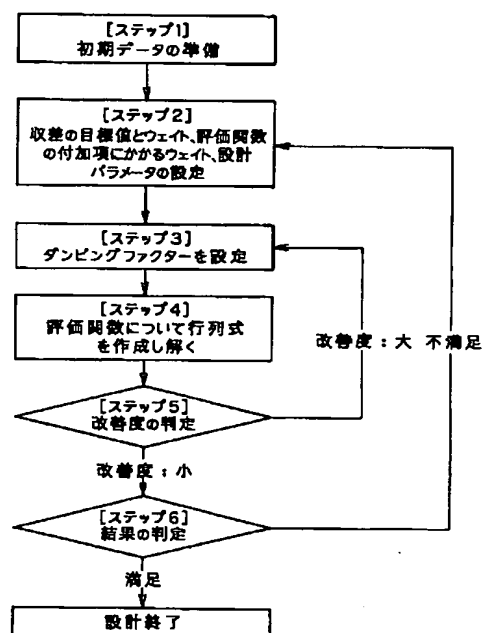
5B046 AA09 BA02

(54)【発明の名称】 光学系の設計手法

(57)【要約】

【課題】 コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法。

【解決手段】 複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、その複数の構成要素の値を変更し、各構成要素の値が光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む評価関数とを有する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、

前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、

前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計手法。

【請求項2】 前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることを特徴とする請求項1記載の光学系の設計手法。

【請求項3】 複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことを特徴とする請求項2記載の光学系の設計手法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、光学系の設計手法に関し、特に、コンピュータ等の計算処理装置での実行に適した光学系の設計手法、及び、光学系の設計プログラムを記録した記録媒体、及び、本光学系の設計手法乃至光学系の設計プログラムを用いて設計した光学系及び光学装置に関するものである。

【0002】

【従来の技術】光学系の設計手法では、最急降下法、共役勾配法、最小二乗法等が利用されている。何れの方法も、最適化手法と呼ばれるもので、複数の変数を有する評価関数を用いられる。これらの最適化手法を光学系の設計に用いた場合、評価関数の変数に相当するのが評価項目（例えば、収差係数）である。この評価項目は、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率等といった光学系の構成要素の値に基づいて算出される。よって、構成要素の値を変化させると評価項目の値が変化し、評価項目の値が変化すると評価関数の値が変化する。そこで、構成要素の値を様々に変化させ、評価関数の最適値（例えば、最小値や極小値）を求める処理を行う。このようにして評価関数の最適値が得られると、そのときにおける各構成要素の値の組み合わせが最適な光学系を表すことになる。この結果、理想状態に近い光学系の構成要素の値が得られる。なお、評価関数の最適値を求める際には、同時に評価項目も所望の目標値へと近づけることを行う。このように、光学系の設計は、評価関数が最適値となり、かつ、評価項目が目標値の範囲内に到達するような、光学系の構成要素の値の組み合わせを求めるものである。

【0003】上述のように、光学系の設計に際しては、

基本的な変数として、光学作用面の曲率半径、面間隔、及び、屈折率を用いるのが一般的である。また、評価関数は、光線収差や光学系の仕様で決まる制限条件等を評価項目として用いるのが一般的である。

【0004】しかしながら、従来の光学系の設計では、理想的な状態で光学系を設計しているため、光学系の製造誤差の影響を無視した設計となる傾向がある。そのため、製造誤差による光学系の性能の変化を考慮に入れた、最適な光学系の構成要素の値の組み合わせ（設計値）を得ることが困難であった。

【0005】従来の技術においては、設計者の経験や知識といったノウハウ等に基づいて、製造誤差による光学系の性能の変化が少なくなるように、コンピュータで得た設計値から設計者自身の手作業によって設計値に若干の修正を加えたり、光学系の変数の一部を固定値とし、変数の数に制限をかける等をして、最適な光学系の設計値を得るといった作業を行う必要があった。

【0006】このため、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、従来の光学系の設計では人手と時間が必要で、効率的な光学系の設計が行えなかった。また、製造誤差による性能の変化を小さく抑え、かつ、設計性能が所望の値となる最適な光学系の設計値を得るのが難しい。

【0007】近年、上記の問題点を鑑み、特開平11-30746号公報、特開平11-223764号公報、特開平11-223769号公報、特許第3006611号公報等で新たな設計法が提案されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】特開平11-30746号で開示されている方法においては、注目している光学群以外の偏心収差係数の絶対値が急激に悪化して、結果的に製造誤差の影響を受ける設計値が得られてしまう。これを回避するため、その都度注目する光学群の偏心収差係数を増やしていくことは、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0009】特開平11-223764号、特開平11-223769号で開示されている方法においては、球面収差係数とコマ収差係数のみに注目しているため、光学系の偏心による非点収差や像面の傾きによる性能変化の顕著な光学系においては、製造誤差の影響を受け難い設計解が得られなくなり、問題がある。

【0010】特許第3006611号で開示されている方法においては、複数の光学部材で構成される光学系に対して、全ての製造誤差を考慮した設計状態を実現すること、全ての状態での評価関数を定義することが必要であったり、評価関数が複雑となるために評価関数の計算量が莫大となってしまう、コンピュータの計算速度の向上にもかかわらず、結果的に人手や時間が必要となり、効率的な設計という観点で問題がある。

【0011】本発明は従来技術の上記問題に鑑みてなさ

れたものであり、その目的は、コンピュータで実行するのに適し、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うための光学系の設計手法を提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計手法において、前記評価関数は少なくとも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする手法である。

【0013】この場合、前記光学系の全ての光学作用面の光軸と前記光学系の基準軸が一致した状態で近軸光線の諸量を計算する過程と、該状態で前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の収差係数を計算する過程とを備え、前記収差係数と前記近軸量とから前記偏心収差係数を計算する過程を備えることが望ましい。

【0014】また、複数の光学作用面から偏心収差係数の冪乗和を計算する過程を備え、前記評価項目は前記偏心収差係数の冪乗和を含むことが望ましい。

【0015】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心コマ収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0016】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心非点収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0017】また、前記偏心収差係数の冪乗和は、偏心ペッツバル収差係数の冪乗和にしてもよい。

【0018】本発明は、評価関数を用いて設計を行う光学系の設計プログラムにおいて、前記評価関数は少なく

(収差) = (偏心のない状態での収差) + (偏心により発生する収差)

(1)

で定義される。式(1)から明らかなように、光学系の一部が偏心することによって生ずる収差(偏心収差)によって、光学系の性能は変化してしまう。現実の光学系では、偏心はレンズの製造、あるいは、レンズの組み立て時の製造誤差(組み立て誤差)として現れる。このように、偏心(製造誤差)は、理想的な光学系の性能を得ることを困難ならしめる要因の1つとなっている。

【0024】光学作用面や光学群が偏心することによって、光学系の結像性能に変化が発生するが、この変化を代弁する指標の1つに、偏心収差係数がある。偏心収差係数には、偏心コマ収差、偏心非点収差、偏心ペッツバル収差(偏心による像面の傾きの収差)、偏心デストーション(偏心歪曲収差)、偏心による像のずれがある。これら偏心収差係数は、近軸光線の追跡結果と3次の収差係数により記述される。

【0025】なお、偏心収差並びに偏心収差係数の導出方法は、松居吉哉著「偏心の存在する光学系の3次の収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、1990年)に、3次の収差係数の導出については、松居吉哉著「収差論」((社)日本オプトメカトロニクス協会、

とも1つの評価項目を変数として有し、前記評価項目は、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面の偏心収差係数を含むことを特徴とする光学系の設計プログラムを含むものである。

【0019】また、上記の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体を含むものである。

【0020】さらに、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学系を含むものである。

【0021】また、本発明は、上記の何れかの光学系の設計手法、又は、上記光学系の設計プログラムを用いて設計、あるいは、製造されたことを特徴とする光学装置を含むものである。

【0022】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施の形態について説明する。まず、本発明で用いる偏心収差係数について説明する。

【0023】光学系を構成する光学作用面、又は、少なくとも1面の光学作用面よりなる光学群の光軸が、光学系の基準軸に対して一致していない状態を偏心状態という。この中、図2に示すように、上記光軸が基準軸に対して平行にずれた状態を平行偏心、図3に示すように、上記光軸が基準軸に対して傾きを持って交わるような状態を傾き偏心とする。光学系に前述のような平行偏心乃至傾き偏心が発生した状態の光学系の収差は、

1989年)に詳述されているため、割愛し、偏心収差係数と偏心収差の定義のみを記述する。

【0026】まず、偏心収差係数を導出に必要な光学系の第i面における近軸光線の諸量と3次の収差係数を、

【0027】

【数1】

h_i : 軸上マージナル光線の光線の高さ

α_i : 軸上マージナル光線の物体空間における換算傾角

α'_i : 軸上マージナル光線の像空間における換算傾角

\bar{h}_i : 近軸主光線の光線の高さ

$\bar{\alpha}_i$: 近軸主光線の物体空間における換算傾角

$\bar{\alpha}'_i$: 近軸主光線の像空間における換算傾角

I_i : 球面収差係数

II_i : コマ収差係数

III_i : 非点収差係数

P_i : ベッツパール収差係数

V_i : ディストーション (歪曲収差係数)

$$\Delta Y_\delta = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ (\Delta\delta)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\delta_1)_i - (V\delta_2)_i \} + 2rh \{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \quad (2)$$

$$\Delta Z_\delta = -\frac{E_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\delta_1)_i + 2rh \{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \} + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \quad (3)$$

で定義される。ただし、 h 、 r 、 ϕ_r 、 ϕ_ω は、図 1 より、

【0031】

【数3】

$$\tan \omega \cos \phi_\omega \equiv \frac{Y}{\bar{g}} \quad \tan \omega \sin \phi_\omega \equiv \frac{Z}{\bar{g}}$$

$$r \cos \phi_r \equiv \left(\frac{\bar{g}}{g} \right) Y^* \quad r \sin \phi_r \equiv \left(\frac{\bar{g}}{g} \right) Z^*$$

$$h \equiv N \tan \omega$$

$$(II\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) - (\bar{\alpha}'_k \sum_{\nu=k+1}^n I_\nu - \bar{\alpha}_j \sum_{\nu=j}^n I_\nu) \quad (4)$$

と、平行偏心非点収差係数 $(III\delta)_i$ は、

【数5】

【0034】

$$(III\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n III_\nu) - (\bar{\alpha}'_k \sum_{\nu=k+1}^n II_\nu - \bar{\alpha}_j \sum_{\nu=j}^n II_\nu) \quad (5)$$

と、平行偏心ベッツパール収差係数 $(P\delta)_i$ は、

【数6】

【0035】

と定義する。ここで、近軸光線の諸量とは、光学系の面に入射する光線の入射光線高と入射角である。

【0028】前述のように、偏心状態には平行偏心と傾き偏心の2種類の状態があるが、先に平行偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論じ、次に傾き偏心の状態における偏心収差係数と光学系の収差について論ずる。

【0029】光学系が n 面の光学作用面により構成されている光学系において、図2のように、 j 面から k 面で構成される第 i 群が光学系の基準軸に対して、 δ_i だけ平行偏心した場合を考える。この場合、光学系の平行偏心による光線の横収差 ΔY_δ 、 ΔZ_δ を幕で展開すると、

【0030】

【数2】

で定義される。 N は光学系の物体側の屈折率、 ω は物点と物体側主点 H とを結ぶ直線が光軸となす角、 ϕ_ω はそのアジマス、また、 r は物体側主平面上に換算した入射瞳半径で、 ϕ_r がそのアジマスである。

【0032】また、平行偏心コマ収差係数 $(II\delta)_i$

i は、

【0033】

【数4】

$$(P\delta)_i = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n P_\nu) \quad (6) \quad \text{【0036】}$$

と、平行偏心デイスティーション収差係数 ($V\delta_1$, $V\delta_2$) は、

$$V\delta_1 = (\alpha'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) \quad (7)$$

$$V\delta_2 = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu \quad (8)$$

と、平行偏心による像のずれ ($(\delta)_1$) は、

【数8】

【0037】

$$(\Delta\delta)_i = -2(\alpha'_k - \alpha_j) \quad (9)$$

と定義できる。

【0038】 平行偏心と同様に、光学系が n 面の光学作用面により構成されている光学系において、図3のように、 j 面から k 面で構成される第 i 群が光学系の基準軸に対して、 ϵ_1 だけ傾き偏心した場合を考える。この場

合の、光学系の傾き偏心による光線の横収差 ΔY_ϵ 、 ΔZ_ϵ を幕で展開すると、

【0039】

【数9】

$$\begin{aligned} \Delta Y_\epsilon = & -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \\ & \left\{ (\Delta\epsilon)_i + h^2 \{ (2 + \cos 2\phi_\omega)(V\epsilon_1)_i - (V\epsilon_2)_i \} \right. \\ & + 2rh \left\{ (2 \cos(\phi_r - \phi_\omega) + \cos(\phi_r + \phi_\omega))(III\delta)_i + \cos \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \right\} \\ & \left. + r^2 (2 + \cos 2\phi_r)(II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_\epsilon = & -\frac{\epsilon_i}{2\alpha'} \left\{ h^2 \sin 2\phi_\omega (V\epsilon_1)_i + 2rh \left\{ \sin(\phi_r + \phi_\omega)(III\delta)_i + \sin \phi_r \cos \phi_\omega (P\delta)_i \right\} \right. \\ & \left. + r^2 \sin 2\phi_r (II\delta)_i \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

で定義される。このとき、傾き偏心コマ収差係数 ($II\epsilon$)₁ は、

【0040】

【数10】

$$(II\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n I_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n I_\mu) \quad (12)$$

と、傾き偏心非点収差係数 ($III\epsilon$)₁ は、

【数11】

【0041】

$$(III\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n III_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n III_\mu) - (\overline{\alpha'_k} p'_k \sum_{\mu=k+1}^n \Pi_\mu - \overline{\alpha_j} p_j \sum_{\mu=j}^n \Pi_\mu) \quad (13)$$

と、傾き偏心ペッツパール収差係数 ($P\epsilon$)₁ は、

【数12】

【0042】

$$(P\epsilon)_i = (\alpha'_k q'_k \sum_{\mu=k+1}^n P_\mu - \alpha_j q_j \sum_{\mu=j}^n P_\mu) + \left(\frac{\alpha'_k}{N'_k} - \frac{\alpha_j}{N_j} \right) \quad (14)$$

と、傾き偏心デイスティーション収差係数 ($V\epsilon_1$, $V\epsilon_2$) は、

【0043】

【数13】

$$V_{\epsilon_1} = (\alpha'_k q'_k \sum_{\nu=k+1}^n V_\nu - \alpha_j q_j \sum_{\nu=j}^n V_\nu) - (\overline{\alpha'_k p'_k} \sum_{\nu=k+1}^n III_\nu - \overline{\alpha_j p_j} \sum_{\nu=j}^n III_\nu) + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{\overline{N'_k}} - \frac{\overline{\alpha_j}}{\overline{N_j}} \right) \quad (15)$$

$$V_{\epsilon_2} = \overline{\alpha'_k} \sum_{\nu=k+1}^n P_\nu - \overline{\alpha_j} \sum_{\nu=j}^n P_\nu + \left(\frac{\overline{\alpha'_k}}{\overline{N'_k}} - \frac{\overline{\alpha_j}}{\overline{N_j}} \right) \quad (16)$$

と、傾き偏心による像のずれ $((\epsilon)_1)$ は、
【0044】

と定義できる。ただし、 $P_j (\Delta p)_k = -2(\alpha'_k q'_k \overline{q} \alpha_j q_j)$
 k は、図3に示すように、それぞれ、
 P_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の入射端面
までの距離
 p'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の射出端面
までの距離
 q_j : 光学群の傾きの回転中心から光学群の物体面ま
での距離
 q'_k : 光学群の傾きの回転中心から光学群の像面まで

の距離で定義される量である。

【0045】次に、従来の評価関数 F_0 を用いた光学系の設計手法について、例として、最小二乗法の一種である減衰最小二乗法(DLS法)を用いた場合で説明する。ここで、従来の評価関数 F_0 は、光学系に偏心が生じていないことを前提としている。

【0046】DLS法での評価関数 F は、

【0047】

【数15】

$$F_0 = \sum_{a=1}^m f_a^2 + \sum_{b=1}^n D(x_b - x_{0b})^2 \quad (18)$$

で定義される。DLS法の場合、評価関数 F_0 の値がの極小値となったときに、各収差が良好に補正され、かつ、全体としても収差のバランスが取れた光学系となる。この評価関数 F_0 の極小値を求めるためには、

【0048】

【数16】

$$\frac{\partial F_0}{\partial x_b} = 0 \quad (19)$$

を満足する x_b の組を求めればよい。ここで、 f_a は光学系の収差に関し、 w_a を第 a 番目の収差のウェイト、 R_a を a 番目の収差の値、 T_a を第 a 番目の収差の目標値としたとき、

$$f_a = w_a (R_a - T_a)^2$$

で定義される。ただし、各収差値 R_a は設計パラメータ x_1, x_2, \dots, x_n の関数である。また、設計パラメータ x_b は曲率半径や面間隔、屈折率等の光学系の構成要素の値、 x_{0b} は設計開始時点における設計パラメータ、 D はダンピングファクターをそれぞれ表している。ダンピングファクター D は、設計パラメータが設計開始時点での値(初期値)から離れることを適度に防ぐ働きをする。また、 m は評価を行う収差の数、 n は設計

に用いるパラメータの数をそれぞれ表している。

【0049】上記のような評価関数 F_0 において、初期値近傍では各収差値が設計パラメータの線形関数として近似できる。このため、式(19)は x_b に対して線形な連立方程式となるので、最小二乗法により解くことが可能であり、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に計算することができる。

【0050】DLS法以外の手法においても、各手法に則した評価関数が定義されている。また、コンピュータを用いることで、高速かつ容易に評価関数の所望の値を求めることができる。よって、これらの手法とコンピュータを組み合わせれば、最適な光学系の設計値を高速かつ容易に得ることができる。

【0051】評価関数の所望の値は、上記DLS法に示した極小値とする場合以外に、極大値とする場合等、設計手法により様々である。

【0052】さて、本発明の実施形態にかかる光学系の設計手法について説明する。本発明の実施形態である評価関数 F は、

【0053】

【数17】

$$F = F_0 + F_{dec} \quad (20)$$

で定義される。ただし、 F_0 は、従来の設計手法における評価関数を表す。また、 F_{dec} は、 $(II\delta)_1$ 、 $(I II\delta)_1$ 、 $(P\delta)_1$ 、 $(II\epsilon)_1$ 、 $(III\epsilon)_1$ 、 $(P\epsilon)_1$ の中、少なくとも1つの偏心収差係数により定義される評価関数の項である。このような評価関数を用いることで、従来の評価関数 F_0 では考慮しなかった

偏心による光学性能の変化成分を、光学系の設計に加味することができる。よって、光学群の偏心により発生する光学系の性能劣化が抑制され、かつ、偏心のない状態での光線収差が小さい、最適な光学系の設計値を求めることが可能となる。

【0054】さらに好ましくは、 F_{dec} は、各光学群で

生ずる偏心収差係数の絶対値の冪乗和の項からなるとよい。このような評価関数を用いることで、偏心収差係数の絶対値が大きい光学群があったとしても、その偏心収差係数の絶対値を小さくすることができる。しかも、同時に、他の光学群の偏心収差係数の絶対値が大きくなることを抑制することができる。この結果、評価関数の最適値をより速く求めることができる。よって、本発明の設計手法では、従来の設計手法よりも効率的な設計がで

$$F_{dec} = \omega_{ll} f \left(\sum_{i=1}^n |(\Pi\delta)_i|^{kn_i} \right) \quad (21)$$

このような評価関数を用いることで、平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きい光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値を小さくすると同時に、他の光学群の平行偏心コマ収差係数の絶対値が大きくなり難くすることができ、従来の設計手法よりも効率的な設計ができる。

【0057】上記では、平行偏心コマ収差係数の場合について述べているが、平行偏心コマ収差係数を平行偏心非点収差係数、平行偏心ベッツパール収差係数、傾き偏心コマ収差係数、傾き偏心非点収差係数、傾き偏心ベッツパール収差係数と変更しても、同様の効果が得られることは言うまでもない。

【0058】また、評価関数の項（変数）を1つの偏心収差係数の絶対値の冪乗の和ではなく、複数の偏心収差係数の和の絶対値の冪乗や、絶対値の和の冪乗とすることもできる。この場合、前述と同様な効果が得られることは言うまでもなく、さらに、光学群内でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0059】また、上述の複数の偏心収差係数について冪乗したものについて和をとり、それを評価関数の評価項目とすることもできる。このようにすれば、光学系全体でそれぞれの偏心収差をバランス良く小さくすることができるので好ましい。

【0060】また、任意の実数 k は、 $1 \leq k \leq 4$ なる条件を満たすことがよい。上記条件を外れると、収差値の最適化と製造誤差による光学系の性能変化の抑制を両立させることが難しくなってしまう、問題となってしまう。

【0061】さらに好ましくは、 $k=2$ とすることで、本発明における光学系の設計手法を最も有効に働かせることができ、さらに、コンピュータの計算を高速にできるので、最も望ましい。

【0062】図4は、本実施形態にかかる光学系の設計手法の手順を示すフローチャートである。ステップ1で、光学系の初期データを用意する。ステップ2で、諸収差の目標値とウェイトといった従来の評価関数にかかる諸パラメータ、及び、本設計手法で導入した評価関数にかかる諸パラメータを設定する。ステップ3で、ダンピングファクターを設定する。ここで、通常はダンピン

きる。

【0055】例えば、 n 個の光学群よりなる光学系において、平行偏心コマ収差係数に着目する場合、 F_{dec} は、式(21)のように定義することが好ましい。ただし、 ω は設計者自身の定めるウェイト、 k は任意の実数である。

【0056】

【数18】

グファクターのデフォルト値が設定される。以上のステップで、評価関数を決定する。次に、ステップ4において、評価関数についての行列式、すなわち、連立方程式を作成し、解を得る。続くステップ5で、評価関数の値を評価し、評価関数の値が所望の値に到達したと判定した場合、続くステップ6へと進み、到達し得ない場合、ステップ3へと戻る。ステップ6において、得られた設計値が設計目標を満足するならば、設計を終了し、不満足ならば、ステップ2に戻り、設計条件を変更して設計を続行する。上述したフローにおいて、ステップ3からステップ5までがコンピュータのプログラムに適している。

【0063】以下に、本発明の実施形態を用いて設計した光学系の実施例を示す。

【0064】実施例1は、デジタルカメラの光学系に、本発明の平行偏心コマ収差係数を用いた光学系の設計手法を適用した場合について示す。図5に示すような光路図を持ち、以下の表1に示すような設計開始時のレンズデータを持つ光学系の結像性能を表すMTFは、図6の通りである。ただし、図5において数字1～12は面番号を示し、符号A～Eはレンズエレメント番号を示す。なお、光学系の仕様は、焦点距離=3.9mm、Fナンバー=2.8、理想像高=2.4mmであり、像評価に用いるMTFは、空間周波数50本/mmでの評価とする。図6(a)は軸上でのMTF、図6(b)は像高の0.7でのMTFであり、横軸はデフォーカスであり、実線はサジタル方向の値、破線はメリジオナル方向の値である。

【0065】この光学系のレンズエレメントを光学群の単位とし、各エレメントが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、軸上光束の結像性能の変化を表したものが表2である。ただし、 $R(\%)$ はサジタル方向のMTFの変化値、 $T(\%)$ はメリジオナル方向の変化値である。この表の値が小さい程、光学群が偏心しても性能への影響が小さいことに対応している。

【0066】このような光学系に対して、DLS法を基に評価関数を式(22)と定義した本発明の設計方法を適用した結果、図7に示すような光路図を持ち、以下の表3に示すような設計終了時のレンズデータを持つよう

な光学系が得られる。
【0067】

【数19】

$$F = F_0 + w_{\Pi\delta} \sum_{i=1}^k |(\Pi\delta)_i|^2 \tag{22}$$

このときの結像性能を表す図6と同様のMTFは図8の通りであり、設計開始時点での結像性能と略同等である。この光学系の各レンズが光軸に対して0.1mm平行偏心した場合、結像性能が表4のような変化となる。このことから、設計開始時点と略同等の性能を達成し、かつ、各レンズの平行偏心による性能の変化が発生し難い光学系の設計値を得ることができる。また、平行偏心コマ収差係数の絶対値の二乗和は、表5のように小さくなっている。

ータを示す。ただし、光学系データの非球面は、コーニック係数：K、曲率：c（c=1/曲率半径）、4次の非球面係数AC₄、・・・を用いて、以下の式で定義される。

【0069】 $Z = c r^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + K) c^2 r^2}] + AC_4 r^4 \cdots$

ここで、Zは光軸に沿った座標軸、rはZ軸からの半径である。

【0070】

【0068】以下に、設計開始時点と設計後の光学系デ

表1

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッペ数
物体面	∞	∞		
1	8.9512	0.8000	1.48749	70.23
2	2.2965	3.9071		
3	224.8333	1.8986	1.83400	37.16
4	-4.8216	0.8000		
絞り面	∞	2.8850		
6	-3.1214	0.8000	1.84666	23.78
7	4.5368	4.0000	1.78590	44.20
8	-4.9428	0.1937		
9	7.7737（非球面）	3.3651	1.56384	60.67
10	-11.3280	1.9084		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.1013		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC ₄		
9	0.0	-8.8037×10 ⁻⁴		

【0071】

表2

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
ΔMTF R (%)	-10.6	-19.6	-1.2	-0.2	0.0
ΔMTF T (%)	-26.9	-46.2	-12.4	-1.1	0.0

【0072】

表3

面番号	曲率半径	面間隔	屈折率	アッペ数
物体面	∞	∞		
1	-1447.5433	0.8000	1.48749	70.23
2	3.1192	3.7577		
3	18.5526	1.8222	1.83400	37.16
4	-6.7327	0.8000		

絞り面	∞	2.8871		
6	-3.6762	0.8000	1.84666	23.78
7	5.4479	4.0000	1.77250	49.60
8	-5.2921	0.1934		
9	8.1262 (非球面)	3.1860	1.56384	60.67
10	-10.4919	2.1689		
11	∞	2.5000	1.51633	64.14
12	∞	1.2598		
像面	∞			
非球面係数				
面番号	K	AC_4		
9	0.0	-9.7855×10^{-4}		

【0073】

表4

レンズエレメント番号	A	B	C	D	E
ΔMTF R (%)	-3.6	-5.5	-0.6	-0.4	0.0
ΔMTF T (%)	-9.9	-23.3	-12.2	-1.2	0.0

【0074】

表5

設計開始時	設計後
0.0516	0.0170

【0075】以上、本発明の光学系の設計手法をその原理と実施例に基づいて説明してきたが、本発明はこれら実施例等に限定されず種々の変形が可能である。

【0076】以上の本発明の光学系の設計手法は、例えば次のように構成することができる。

【0077】〔1〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計手法において、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計手法。

【0078】〔2〕前記光学系の近軸光線を計算する手段と、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の収差係数を計算する手段と、前記収差係数と前記近軸光線とからなる偏心収差係数を計算する手段とを有することを特徴とする上記1記載の光学系の設計手法。

【0079】〔3〕 n 個の光学群よりなる前記光学系において、偏心収差係数の冪乗和を計算する手段と、少

なくとも1つの偏心収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数とを有することを特徴とする上記2記載の光学系の設計手法。

【0080】〔4〕偏心コマ収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3記載の光学系の設計手法。

【0081】〔5〕偏心非点収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0082】〔6〕偏心ペッツバル収差係数の冪乗和からなる評価関数の項を有する前記評価関数を有することを特徴とする上記3の光学系の設計手法。

【0083】〔7〕複数の構成要素で表現される光学系が所望の特性となるように、前記複数の構成要素の値を変更し、前記各構成要素の値が前記光学系全体として最適な構成要素の値へと近づいていることを評価する評価関数を所望の値へと近づけることで、最適な構成要素の値を得る光学系の設計プログラムにおいて、前記光学系の光学作用面の少なくとも1面からなる光学群の偏心収差係数を計算する手段と、少なくとも1つの前記偏心収差係数からなる評価関数の項を少なくとも1つ含む前記評価関数とを有することを特徴とする光学系の設計プログラム。

【0084】〔8〕 上記7記載の光学系の設計プログラムを記録したことを特徴とする光学系の設計プログラムの記録媒体。

【0085】〔9〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学系。

【0086】〔10〕 上記1から6の何れか1項記載の光学系の設計手法、又は、上記7記載の光学系の設計プログラムを用いて設計されたことを特徴とする光学装置。

【発明の効果】以上の説明から明らかなように、本発明の光学系の設計手法によると、諸収差等の光学設計に加えて、製造誤差による光学系の性能変化を抑制した光学系の設計を効率良く行うことができるようになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】光学系を模式的に示す光軸を含む断面図である。

【図2】光学系の平行偏心を説明するための図である。

【図3】光学系の傾き偏心を説明するための図である。

【図4】本発明の1実施形態にかかる光学系の設計手順を示すフローチャートである。

【図5】本発明の1実施例の設計開始時のレンズ系の光路図である。

【図6】図5のレンズ系のMTFを示す図である。

【図7】本発明の1実施例の設計終了時のレンズ系の光路図である。

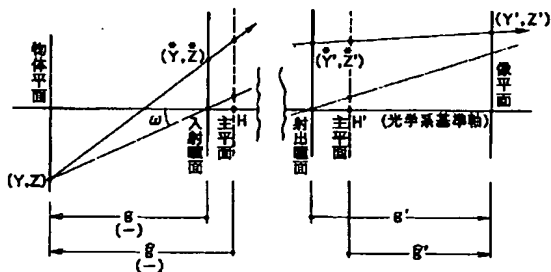
【図8】図7のレンズ系のMTFを示す図である。

【符号の説明】

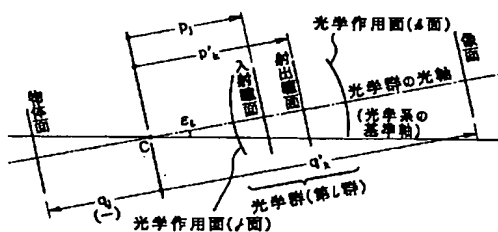
1～12…第1面～第11面

A～E…レンズエレメント

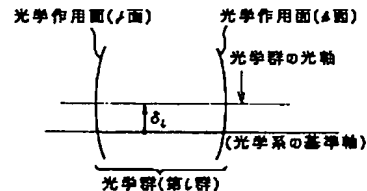
【図1】



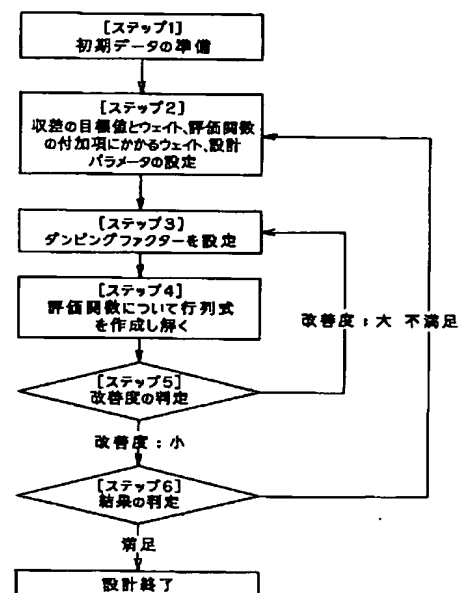
【図3】



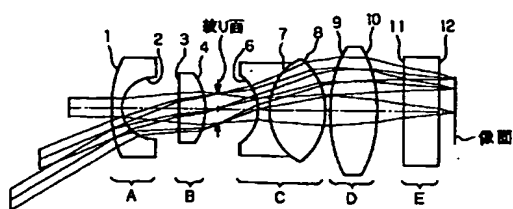
【図2】



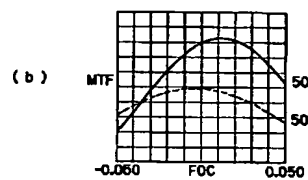
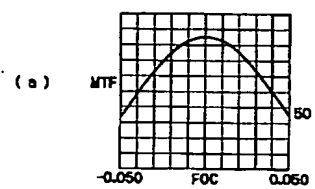
【図4】



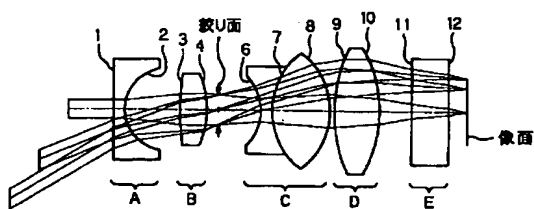
【图5】



【图6】



【图7】



【图8】

